

Modélisation du transport de fret multimodal par Réseau de Petri de Haut Niveau, pour la résilience des ports maritimes Européens

Armand Toguyéni¹, Guilherme Espindola Winck¹, Benoît Trouillet¹, and
Rochdi Merzouki²

¹ Centrale Lille Institut/CRISAL
armand.toguyeni@centralelille.fr,
guilherme.espindola@centralelille.fr,
benoit.trouillet@centralelille.fr
² Université de Lille/CRISAL,
rochdi.merzouki@univ-lille.fr

Résumé

Ce papier présente une étude ayant pour objectif la conception d'un outil de décision pour contribuer à la résilience des ports. L'idée est d'utiliser la caractéristique de transport multimodal des ports pour trouver des alternatives au transport maritime en cas d'évènement climatique extrême. Partant du constat qu'un réseau de transport multimodal est un système de systèmes, nous proposons une approche de modélisation basée sur les Réseaux de Petri Colorés, Temporisés de Haut-Niveau (RdPCTH). Nous développons des modèles génériques sous CPN Tools qui permettent de développer rapidement un modèle du système sans tomber dans la complexité induite par la taille du système. Ce modèle est ensuite simulé afin d'évaluer les performances des solutions envisagées et ainsi de pouvoir décider en prenant en compte les capacités et contraintes temporelles du système de transport multimodal.

1 Introduction

Les changements climatiques en cours montrent que dans les prochaines années, les ports maritimes seront soumis à des événements climatiques extrêmes qui réduiront leurs capacités opérationnelles pendant certaines périodes. Ce travail est une contribution à la résilience des ports en cas d'évènements climatiques extrêmes. L'idée développée ici est d'augmenter le transport multimodal à la place du transport maritime pendant une certaine période. Pour atteindre cet objectif, il est nécessaire de développer des outils d'aide à la décision multicritères. Parmi les critères essentiels, nous allons nous intéresser ici à l'évaluation des performances multimodales. Cette évaluation n'est pas simple car elle doit prendre en compte les capacités résiduelles à l'échelle d'un système de systèmes. Ce travail propose une méthode d'évaluation basée sur les Réseaux de Petri Colorés et Temporisés de Hauts-Niveaux (RdPCTH). Pour évaluer les performances d'un large système de transport, l'idée est d'utiliser les caractéristiques de ces Réseaux de Petri (RdP) afin de modéliser le système de transport multimodal reliant les différents ports. Dans ce travail nous proposons une approche de modélisation basée sur les concepts d'abstraction par niveaux et de généralité. Ce travail est donc une contribution à l'utilisation des RdPs pour la modélisation de systèmes de systèmes. A notre connaissance, c'est la première étude qui le fait même si d'autres auteurs ont proposé des approches modulaires pour la modélisation des systèmes de grande taille [2].

L'article est structuré en huit sections. La section 2 permet d'énoncer le problème et de positionner le contexte de l'étude. Dans la section 3, nous proposons un état de l'art des

approches de modélisation du transport multimodal. Dans la section 4, nous présentons nos principes de modélisation. La section 5 propose une approche générique de modélisation des nœuds multimodaux et la section 6 s'intéresse à la modélisation générique des composants du transport ferroviaire. Dans la section 7, nous illustrons l'approche au travers de la modélisation d'un cas d'étude. Nous y montrons comment interpréter les résultats obtenus. Nous finissons l'article par une conclusion qui donne notamment les perspectives de ce travail.

2 Enoncé du problème et contexte de l'étude

La résilience d'un port a été définie dans le cadre du projet Européen SAFARI comme la capacité à résister à des événements climatiques en limitant la baisse de capacité du port. Pour cela, l'un des objectifs est de définir un système d'aide à la décision permettant de trouver des solutions pour évacuer le plus de fret (au moins 20% de la capacité du port) avant l'événement et pendant l'événement afin de revenir rapidement au régime permanent, 2 semaines après l'événement. Les solutions envisagées consistent à utiliser le transport de fret multimodal. Dans ce travail, le transport de fret auquel nous nous intéressons en particulier est le transport combiné. Il s'agit du transport de fret par conteneurs. Le transport multimodal est basé sur des nœuds (ou hubs) traversés par au moins deux types de systèmes de transport parmi, le ferroviaire, le fluvial, le fret routier et le maritime. Ainsi un nœud multimodal permet le transbordement de marchandises entre ces types de transport. Un port maritime multimodal peut exploiter ces différents types de transport. Pour cela, il est nécessaire de modéliser ce système multimodal en prenant en compte les capacités des nœuds et des réseaux de transport.

L'objectif du projet SAFARI est de permettre la résilience des ports Européens. Le projet SAFARI a retenu trois ports pilotes pour l'expérimentation : Dunkerque en France, Séville en Espagne et Lisbonne au Portugal. Le port de Livourne en Italie servira également de pilote de 2^{ème} niveau sur lequel tester les solutions développées sur les autres ports. En cas de phénomènes climatiques extrêmes, le transport maritime peut ne plus être envisageable. Dans ce cas, l'idée est d'utiliser le fluvial ou le ferroviaire notamment pour transporter les marchandises vers d'autres destinations à moyenne distance. Pour cela, on peut exploiter les 11 corridors de transport de fret multimodal européens [4]. L'objectif de ce travail, est de proposer un cadre basé sur les RdPs permettant de modéliser à différents niveaux le système global afin de servir d'outils d'aide à la décision. Le formalisme RdP retenu devra permettre de modéliser un système de systèmes. L'analyse de performance sera faite par simulation.

3 État de l'art sur la modélisation du transport combiné de fret

Dans la littérature certains travaux comme [1] se sont intéressés à la modélisation d'un système de transport multimodal pour sa gestion. Mais ils s'intéressent plus à l'interopérabilité des Systèmes d'Information des opérateurs. D'autres travaux comme ceux de [6, 11, 10], concernent l'évaluation des capacités statiques et dynamiques d'un nœud multimodal. Des travaux plus spécifiques s'intéressent au transport ferroviaire. Quelques-uns sont basés sur des modèles Systèmes à Événements Discrets (SEDs). En effet, la modélisation des systèmes de transport combiné de fret mobilise les RdPs comme outil formel pour représenter les flux logistiques, les opérations de transbordement, la gestion des terminaux et les dynamiques d'attente ou de synchronisation. Les RdPs permettent de capturer les événements discrets comme les chargements, les départ ainsi que des comportements temporels complexes. Dans [3], les auteurs proposent

un cadre général de modélisation des terminaux de transport intermodal de marchandises. Ils utilisent des RdPs temporisés pour comparer différentes configurations opérationnelles. Dans la littérature, les réseaux stochastiques et temporisés ont été largement appliqués à la simulation d’infrastructures intermodales. À titre d’exemple, [5] ont utilisé des RdPs stochastiques couplés à des chaînes de Markov pour optimiser les opérations air–rail et réduire les retards. La simulation de flux complexes multimodaux a été explorée dans [8], où les auteurs ont modélisé une chaîne logistique agroalimentaire combinant route et maritime, en comparant des scénarios d’optimisation de coûts et de temps de transit. Plus récemment, les “Evaluation Petri Nets” [4] ont été utilisés pour analyser les performances d’accessibilité régionale en environnement multimodal (bus, train, ferry), avec des applications transposables à la gestion du fret. Mais cette approche est centrée sur le transport des passagers. D’autres approches ont été développées à partir des Réseaux de Petri Hybrides pour le pilotage dynamique et la gestion des synchronisations multimodales [7].

Cependant, avec l’augmentation de la complexité des corridors logistiques, les RdP classiques montrent des limites en matière de passage à l’échelle. Il apparaît donc nécessaire d’exploiter des RdPs de Haut-Niveau permettant de modéliser des systèmes de systèmes en facilitant l’abstraction et la généralité [2].

4 Principes de modélisation

Les réseaux de transport multimodaux constituent de fait des systèmes de systèmes. Afin d’éviter l’explosion combinatoire, l’idée est de baser la modélisation sur deux principes : l’abstraction par niveaux et la généralité.

4.1 Abstraction par niveaux

L’abstraction par niveaux correspond à l’approche de réduction de la complexité consistant à décomposer un problème en sous-problèmes plus facilement solvables. Ce principe nous a conduit à décomposer un réseau de transport multimodal en trois niveaux.

Le premier niveau que nous appellerons A0 correspond au système multimodal. A ce niveau, nous ne modéliserons que les nœuds multimodaux et chaque réseau de transport correspondant à chaque modalité. Rapporté par exemple à la Figure 1, cela revient à ne considérer que les nœuds qui soient à la fois des nœuds ferroviaires et des fluviaux. Les autres nœuds ne sont pas pris en compte à ce niveau, réduisant donc la taille du problème et donc sa complexité.

Au niveau A1, on modélise les nœuds modaux du point de vue de leur interaction multimodale. De même à ce niveau, on modélisera chaque réseau multimodal. De manière récursive, un réseau de transport multimodal sera vu comme un ensemble de nœuds d’une même modalité permettant l’accessibilité entre des nœuds multimodaux. Afin de limiter la complexité d’un réseau de transport correspondant à une modalité donnée, ne seront pris en compte que les nœuds significatifs de ce réseau. Seront considérés comme significatifs des nœuds identifiés comme des nœuds de transport du fret combiné. Au niveau A2, on va raffiner le fonctionnement interne de chaque nœud. Pour les nœuds multimodaux, chaque modalité du nœud sera raffinée. C’est également à ce niveau que seront modélisés les composants permettant l’accessibilité directe entre les nœuds d’une même modalité de transport. C’est par exemple au niveau A2 que seront modélisées les voies ferroviaires permettant de relier deux nœuds ferroviaires.

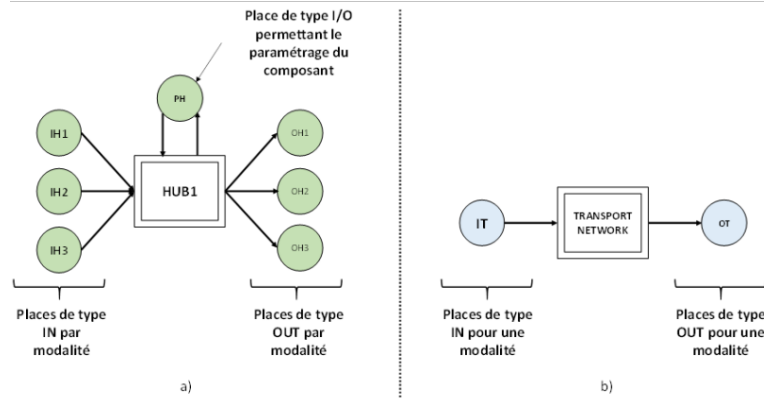


Figure 1: Exemples de patterns définis pour la modélisation des composants – a) composant de type nœud multimodal b) composant de type réseau de transport unimodal.

4.2 Modélisation de composants génériques

Le 2^{ème} principe de base que nous allons utiliser est la genericité. En effet, afin de construire rapidement des modèles de grande taille, nous allons chercher à les caractériser de la manière la plus générique possible en utilisant les principes de la programmation orientée objets. Mais comme les RdPCTH n'intègrent pas d'approche objet de manière native, l'idée est de concevoir des modèles de composants génériques qui soient des patrons de modélisation (pattern). Dans un modèle, chaque pattern sera instancié en lui associant des valeurs de paramètres spécifiques. A chaque pattern seront associées des fonctions de traitement. La Figure 1 illustre nos principes de modélisation. Elle propose des patrons de modélisation pour représenter les nœuds multimodaux (Figure 2a) et les réseaux de transport correspondants à chaque mode (Figure 2b). Ces composants sont utilisés au niveau A0 pour modéliser un système multimodal, selon l'approche illustrée par la Figure 2. Les détails d'implémentation de chaque composant sont abstraits par l'utilisation des transitions de fusion comme HUB1, HUB2 et HUB3 pour les nœuds multimodaux, et également les transitions TRANSPORT NETWORK pour chaque mode de transport. Chaque composant, possède des places d'interfaces en entrée et en sortie. Les places en entrées sont des sockets d'entrée, et les places de sortie sont des sockets de sortie. Les composants sont liés par la fusion de sockets de sortie d'un composant d'un type donné, avec la socket d'entrée d'un composant de l'autre type. Les sockets fusionnées doivent être de même type (même modalité) pour que cette fusion soit possible. Attention, la Figure 1 et la Figure 2 sont juste là pour illustrer nos principes de modélisation. En effet, le nombre de sockets d'entrée ou de sortie d'un composant multimodal dépend de son nombre de modalité. Par souci de simplicité, dans ces figures, nous avons systématiquement représenté des composants à trois modalités. Cela ne correspond pas forcément à la réalité.

5 Modélisation d'un nœud multimodal

Dans les transports terrestres, on distingue quatre types de transport : le transport maritime, le transport routier, le transport ferroviaire et le transport fluvial. Quand nous regardons la carte des terminaux de transport combiné en France, on voit que des nœuds multimodaux combinent par exemple le ferroviaire et le fluvial. Cela correspond à une catégorie de nœuds multimodaux.

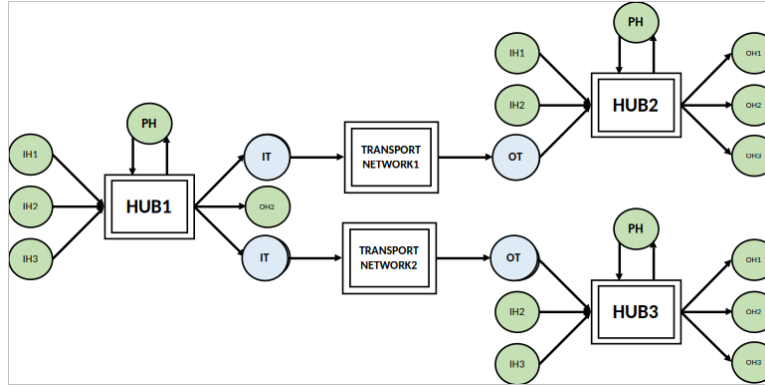


Figure 2: Construction d'un niveau multimodal au niveau A0

Si par exemple, on considère le port de Dunkerque, c'est un nœud dans lequel on retrouve les 4 types de transports. Ce type d'analyse nous a amenés à distinguer six catégories de nœuds multimodaux. Par exemple la catégorie 3 correspond aux nœuds gérant le transport routier, ferroviaire et fluvial (par exemple la plateforme Delta 3 à Dourges dans le Nord). Le port de Dunkerque est un nœud de catégorie 1.

Pour modéliser un nœud multimodal, considérons le schéma simplifié donné par la Figure 3. Ce schéma est simplifié car il considère un stock central qui permet de découpler les flux de chaque mode du transport. Dans la réalité, il peut y avoir des nœuds multimodaux dans lesquels on peut prévoir des synchronisations entre mode de transport avec un transbordement direct des marchandises d'un mode à l'autre. Le stock central est caractérisé par sa capacité qui correspond au nombre maximal de conteneurs que l'on peut entreposer dans ce stock. Donc à un instant donné, cette capacité est définie par le nombre d'emplacements de stockage vides (slots) et le nombre de conteneurs présents dans le stock. Cette capacité peut être modélisée en Réseau de Petri sous la forme d'une paire de places sémaphores de type producteur/consommateur. Un moyen de transport arrivant fonctionne comme un producteur. Il prend des emplacements vides du stock et y décharge des conteneurs. À l'opposé, un moyen de transport qui quitte le nœud est chargé en conteneurs (consommateur) et libère donc des emplacements vides. Mais plutôt que de modéliser la capacité du stock à l'aide de paires de sémaphores, nous avons choisi d'utiliser la coloration pour cela. Dans les caractéristiques d'un stock (cf. Tableau 1 type DNODE) nous allons définir un attribut "slots" qui définit le nombre d'emplacements vides dans le nœud en **Equivalent Vingt Pieds (EVP)**. La valeur initiale de "slots" définit la capacité maximale du nœud en EVP.

Un deuxième attribut nommé "containers" (cf. Tableau 1, type DNODE) indique le nombre de conteneurs se trouvant à un moment donné dans le stock. Initialement, cet attribut est à 0 pour indiquer que le stock est vide. Les autres attributs définissent la capacité du nœud pour accueillir de manière concomitante chaque type de transport. Par exemple l'attribut "trk_cap" définit la capacité en camions de l'aire routière du nœud. Si cette capacité est initialement de 0, cela signifie que le nœud ne gère pas le transport routier. Quand la capacité passe d'une valeur non-nulle à 0, c'est que la capacité maximale a été atteinte pour ce mode de transport. Les autres attributs sont les paramètres moyens qui vont influencer sur le temps de chargement/déchargement d'un porte-conteneur. Si ce n'est pas un nœud maritime ces paramètres sont initialisés à 0. Les paramètres des autres modes de transport sont définis directement dans les jetons correspondants au mode. La Figure 4 illustre le modèle générique

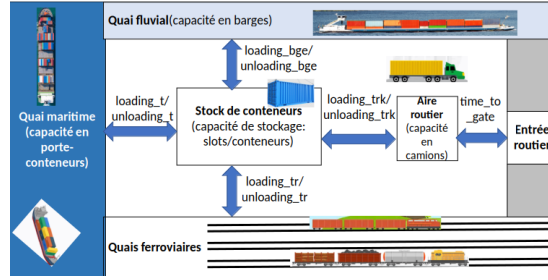


Figure 3: Schématisation d'un terminal de transport combiné de catégorie 1

| Types | Identifiant des nœuds | colset NODE=with NULL BETHUNE CALAIS DON DOURGES DUNKIRC HAVRE HASBR LENS LILLE LISBONNE OSTR SEVILLE SHANGHAI VAL ; |
|---|-----------------------|---|
| | Nœud multimodal | colset DNODE=record nd:NODE * slots:INT * containers:INT * ship_cap:INT * train_cap:INT * barge_cap:INT * trk_cap:INT * loading_t:INT * unloading_t:INT * docking_t:INT ; |
| | Porte-conteneur | colset SHIP=record shipid:INT * cateship : CATESHIP * capacity:INT * loaded:LOADED * from:NODE * to:NODE * next:NODE * path:LISTNODE * fol_path:LISTNODE timed; |
| Exemple | Nœud multimodal | {nd=DUNKIRC, slots=3000, containers=0, ship_cap=3, train_cap=4, barge_cap=3, trk_cap=20, loading_t=5000, unloading_t=5000, docking_t=60, tr_time_in=20, tr_time_out=20 } |
| | Porte-conteneur | {shipid=1, cateship=GRAND, capacity=11000, loaded=FULL, from=SHANGHAI, to=DUNKIRC, next=DUNKIRC, path=[], fol_path=[]}@0 |
| Nom Fonction ML | | Description |
| updateNodeCap (pdu:DNODE, psh: SHIP) | | Fonction de réservation de la capacité d'un nœud multimodal lors de l'arrivée d'un bateau |
| addNodeCont(pdu:DNODE, psh: SHIP) | | Ajout de la capacité du bateau au stock de conteneurs lors du déchargement d'un bateau |
| getNodeCont(pdu:DNODE, psh: SHIP) | | Restitution de la capacité d'un port lors du chargement d'un bateau |
| unloadSHIP(psh: SHIP) | | Fonction de mise à jour de la capacité d'un bateau après déchargement |
| loadSHIP(psh: SHIP, pdu:DNODE) | | Fonction de mise à jour de la capacité d'un bateau après chargement |
| removeNodeShip (pdu:DNODE) | | Mise à jour de la capacité en bateaux d'un nœud après le départ du bateau |
| updateNodeCapTr (pdu:DNODE, ptr: TRAIN) | | Réservation de la capacité d'un nœud multimodal lors de l'arrivée d'un train |
| addNodeContTr(pdu:DNODE, ptr: TRAIN) | | Ajout de la capacité du bateau au stock de conteneurs |
| getNodeContTr(pdu:DNODE, ptr: TRAIN) | | Restitution de la capacité d'un port lors du chargement d'un train |

Table 1: Définition du type nœud multimodal et des fonctions de traitement associées

au niveau A1 d'un nœud multimodal de catégorie C1. On peut remarquer dans ce modèle la présence d'un nœud de type DNODE. C'est le nœud de paramétrage du modèle. Un seul jeton est mis dans ce nœud. Des arcs connectent ce nœud avec les différentes transitions modélisant chaque mode de transport au sein du nœud. Ce nœud est défini comme une place port de type I/O. les autres places du modèle modélisent des ports de type IN (place d'entrée) et des ports de type OUT (places de sortie). Ces ports sont typés en fonction du type de transport modélisé. Un tag bleu correspondant au type de la place montre que chaque port est lié à une socket d'un modèle du niveau supérieur (cf. Figure 2a). Les transitions sont des abstractions du détail du fonctionnement du nœud par rapport à chaque mode de transport. Ce sont donc des transitions de fusion (cf. transition "SEA" et transition "Rail"). Les arcs arrivant de la place paramètre vers une transition modélisant un mode de transport permettent de prendre en compte les capacités résiduelles définies par le jeton paramètre pour savoir si un flux entrant peut être accepté et comment il va impacter le stock de conteneurs. Par rapport à un flux sortant, ils vont permettre de libérer de la capacité dans le nœud.

A chaque catégorie de nœud correspond composant générique qui est un modèle RdPCTH construit selon le même principe.

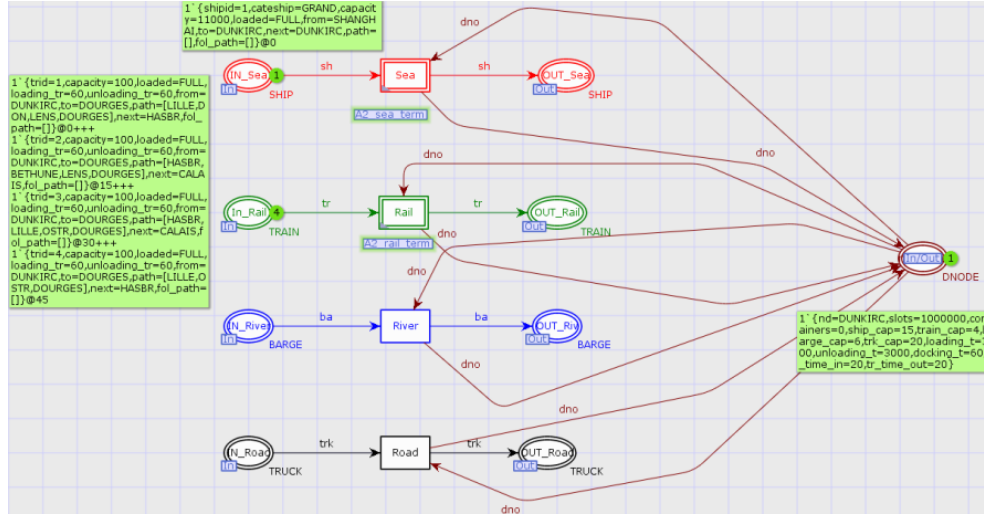


Figure 4: Modèle générique en CPN Tools d'un nœud multimodal défini au niveau A1

6 Modélisation du transport ferroviaire

Dans cette section, nous allons nous intéresser à la modélisation du transport ferroviaire. Notre objectif est d'illustrer ici comment prendre en compte un mode de transport en particulier. Cela nécessite de modéliser ce mode par rapport aux différents niveaux d'abstraction que nous avons définis. Au niveau A1, il faut modéliser l'ensemble des nœuds du système ferroviaire ainsi que les accessibilités entre ces nœuds. Au niveau A2, il faudra modéliser le fonctionnement interne à un nœud et le fonctionnement des liaisons en accessibilité directe entre les nœuds du système ferroviaire.

6.1 Paramètres de caractérisation d'un train

Nous allons d'abord nous intéresser à la définition des paramètres d'un train (cf. Table 2, type TRAIN). Comme l'outil peut être utilisé soit dans le mode contrôlé (itinéraires définis par un autre outil) soit dans le mode découverte, à chaque train sera affecté un attribut mode qui aura soit la valeur "CONTROLLED", soit la valeur "DISCOVERY".

En mode "CONTROLLED", le train doit suivre un itinéraire de nœuds ferroviaires prédéfinis. Cet itinéraire sera spécifié par la valeur de l'attribut "path" qui correspond à une liste de noms de nœuds. Dans le jargon ferroviaire, on appelle cela une circulation, terme qui sera souvent utilisé par la suite pour désigner un train en mode contrôlé. Le chemin parcouru est mémorisé dans l'attribut "fol_path" (followed path) qui correspond également à une liste de noms de nœuds. Afin de router un train au travers du réseau, 3 attributs sont définis : "from" qui indique le nœud de départ, "to" qui indique le nœud de destination finale du train et "next" qui indique le nœud suivant à atteindre. La valeur de "next" est calculée par la fonction move qui retire le nœud en tête de "path". En mode "DISCOVERY", "next" prend la valeur de la route par défaut qui est associée aux caractéristiques d'un nœud. Elle désigne le meilleur voisin d'un nœud et est équivalente aux panneaux "toutes destinations" des réseaux routiers. En sortie d'un nœud, le train est routé vers le nœud indiqué par "next". Si "next" est égal à "to", c'est qu'on a atteint la destination finale et donc il n'y a plus de routage.

| | | |
|-----------------------------------|------------------------|--|
| Types | Identifiant des nœuds | colset NODE=with NULL BETHUNE CALAIS DON DOURGES DUNKIRC HAVRE HASBR LENS LILLE LISBONNE OSTR SEVILLE SHANGHAI VAL ; |
| | Mode de fonctionnement | colset MODE= with CONTROLLED DISCOVERY ; |
| | Niveau de chargement | colset LOADED=with EMPTY EMPTY FULL ; |
| | Liste de dates | colset LISTNODE= list NODE ; |
| | Circulation | colset TRAIN=record trid:INT *capacity:INT * loaded:LOADED * loading_tr:INT *unloading_tr:INT * mode:MODE *from:NODE *to:NODE * path:LISTNODE * next:NODE *fol_path:LISTNODE timed ; |
| | Nœud ferroviaire | colset DRAILNODE= record rnodeid:NODE * train_cap:INT * train_platform:INT * in_crossing_time:INT * out_crossing_time:INT * default_routing:NODE * nexts:LISTNODE ; |
| Exemples | Voie ferroviaire | colset RAILLINE=record llineid:STRING*category:INT*travel_time:INT*from : NODE * to : NODE *line_cap:INT* availability_date:INT * train_paths:DATES ; |
| | Circulation | {trid=1,capacity=100, loaded=FULL, loading_tr=60, unloading_tr=60, mode=CONTROLLED, from=DUNKIRC, to=DOURGES, next=LENS, path=[LILLE,LENS, DOURGES], fol_path=nil}@10 |
| | Nœud ferroviaire | {rnodeid=HASBR, train_cap=4, train_platform=0, in_crossing_time=40, out_crossing_time=40, default_routing=BETHUNE, nexts=[BETHUNE, LILLE, DUNKIRC, CALAIS] } |
| | Voie ferroviaire | {llineid="HasToLille", category=2, travel_time=60, from=HASBR, to=LILLE, line_cap=5, availability_date=15, train_paths={30,45,60} } |
| Nom Fonction ML | | Description |
| fullload(tr1:TRAIN) | | Chargement d'un train |
| unloadTRain(tr1:TRAIN) | | Déchargement d'un train |
| addTrainInLine(lg:RAILLINE) | | Ajoute un train sur la ligne |
| rmvTrainOfLine(lg:RAILLINE) | | Retire un train de la ligne |
| move (tr1:TRAIN) | | Routage d'une circulation vers le prochain nœud ferroviaire en mode CONTROLLED |
| newmove (tr1:TRAIN, md:DRAILNODE) | | Routage d'une circulation vers le prochain nœud ferroviaire en mode DISCOVERY |
| decr_node_cap(rnd:DRAILNODE) | | Décrémente d'une unite la capacite en train d'un nœud ferroviaire |
| incr_node_cap(rnd:DRAILNODE) | | Incrémente d'une unite la capacite en train d'un nœud ferroviaire |

Table 2: Couleurs et fonctions ML pour la gestion du trafic ferroviaire

Les autres attributs caractéristiques d'un train sont son identifiant ("**trid**"), sa capacité en conteneurs EVP ("**capacity**"), son temps moyen de chargement ("**loading_tr**"), et son temps moyen de déchargement ("**unloading_tr**"). Notons que la couleur est temporisée (instruction "**timed**" à la fin de la déclaration). Cette temporisation permettra de dater un train de son départ jusqu'à son arrivée à sa destination finale. Il suffira de calculer la différence entre sa date de départ et sa date d'arrivée pour évaluer la durée du chemin suivi prenant en compte les perturbations qui auront pu retarder la circulation.

6.2 Modèle RdPCTH de la gestion ferroviaire dans un nœud multi-modal

Ce Réseau de Petri (Figure 5) modélise la gestion ferroviaire d'un nœud multimodal. Nous considérons 3 cas de gestion. Le cas 1 est caractérisé par la transition "arrival1". Elle modélise le cas où, un train arrive chargé en conteneurs qui sont déchargés (cf. **transition unloading** sur la Figure 5). Une fois déchargé (place **empty**), ce train charge des conteneurs (transition **loading** sur la Figure 5) et repart du nœud vers une nouvelle destination (transition **departure**). Il est à noter dans le traitement de ce cas, que dès l'arrivée du train sur le nœud, il réserve des emplacement vides pour le stockage des conteneurs qui seront déchargés. Cela est réalisé par la fonction "**updateNodeCapTr(dno,tr)**" (cf. Tableau 1, colonne Nom Fonction ML) qui en plus décrémente la capacité d'accueil du nœud en trains.

Le deuxième cas considéré est lorsqu'un train arrive vide pour récupérer des conteneurs du nœud multimodal. Ce cas modélisé par la transition "**arrival2**". Dans ce contexte, la fonction "**updateNodeCapTr2(dno,tr)**" se contente de décrémente la capacité du nœud à accueillir des nouveaux trains. Par contre, cette fois-ci, il n'y a pas de réservation d'emplacements de

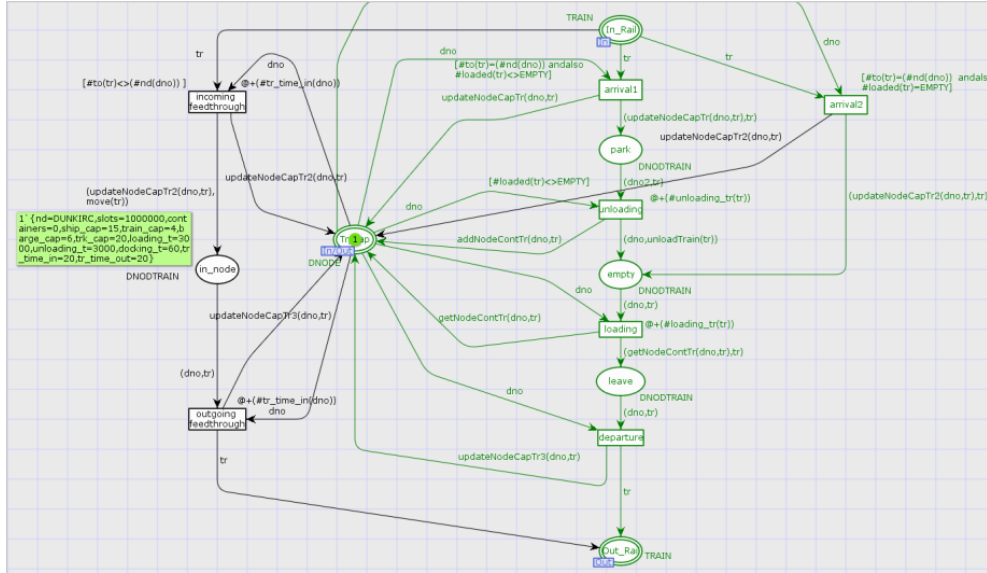


Figure 5: Couleurs et fonctions ML pour la gestion du trafic ferroviaire

stockage. Ce cas est typiquement celui qui servirait pour la résilience des ports pour laquelle, des trains viendraient à vide pour évacuer les conteneurs stockés dans un port impacté par le phénomène climatique. Le 3ème cas considéré est celui où la circulation ferroviaire ne fait que traverser le nœud sans faire de transbordement de conteneurs. Ce cas est modélisé par la transition **"incoming feedthrough"**. Lors de la traversée, nous supposons toutefois que le train s'arrêtera à un quai modifiant temporairement la capacité d'accueil de trains dans le nœud. Cela est de nouveau modélisé par la fonction **"updateNodeCapTr2(dno,tr)"**. Dans tous les cas, lorsque le train quitte le nœud (transition **"departure"**), nous faisons appel à la fonction **"updateNodeCapTr3(dno,tr)"** pour incrémenter la capacité en trains du nœud. Dans ce modèle, la place **Tr_cap** est de type **DNODE**. Grâce au jeton modélisant les caractéristiques du nœud, nous récupérons la capacité courante en accueil de trains par le nœud et en emplacement de stockage vide et en conteneurs stockés. Cette place et son jeton contiennent également les paramètres de performances du nœud, du point de vue temps de traversée de la périphérie du nœud jusqu'au quai (paramètre **"tr_time_in"**) et temps de traversée du quai jusqu'à la sortie du nœud (paramètre **"tr_time_out"**). Ces paramètres sont utilisés sur les transitions d'arrivée dans le nœud et de sortie du nœud, pour mettre à jour le temps de circulation ferroviaire afin de calculer sa performance. Une circulation ferroviaire qui ne fait que traverser voit ses performances impactées uniquement par ces deux paramètres. Si elle contient des conteneurs, elle sera également impactée par les temps de déchargement et chargement des conteneurs du train.

6.3 Modèle RdPCTH d'une voie ferroviaire

Du point de vue du transport de fret, la modélisation d'une ligne ferroviaire doit prendre en compte la capacité de la voie. En effet, la capacité d'une ligne est très importante car elle va influencer les performances du transport. Pour cela, l'UIC a défini une classification internationale des lignes ferroviaires en 6 catégories en fonction du tonnage des circulations de la ligne et des vitesses maximales autorisées. Une autre contrainte des lignes ferroviaires est

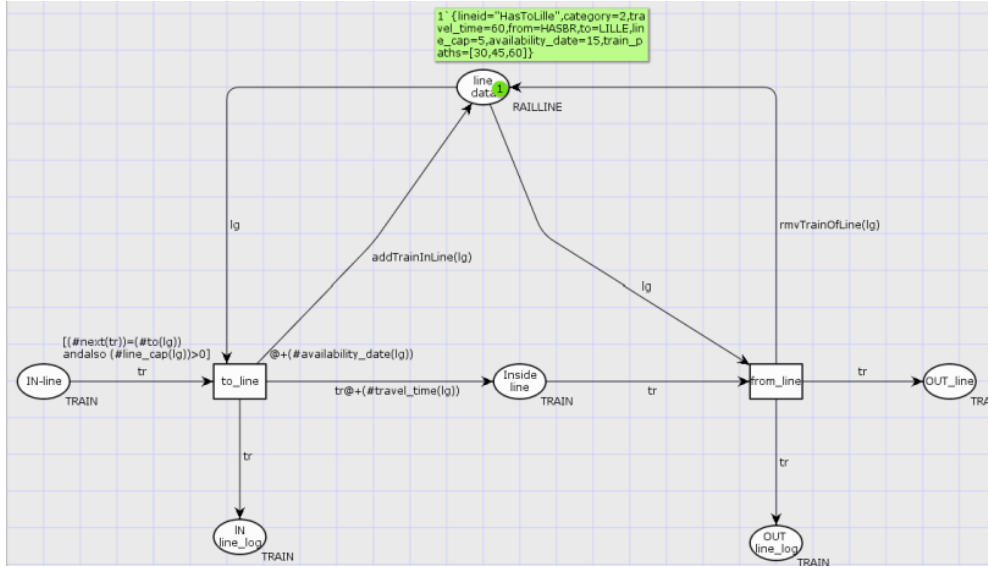


Figure 6: Modèle générique de gestion d'une voie ferroviaire définie au niveau A2

liée à la manière dont elles sont gérées par les opérateurs ferroviaires comme SNCF Réseau. A chaque voie sont associés des sillons. Un sillon définit le parcours d'un itinéraire donné à une vitesse des références fixée sur la ligne. Chaque journée d'exploitation est décomposée en plusieurs sillons représentés sur un diagramme espace-temps. Aussi, sur chaque voie, les trains de fret ne peuvent circuler que sur les sillons qui leur ont été alloués. Il est donc nécessaire de prendre en compte dans la modélisation ces sillons qui sont associés à des horaires précis.

Aussi, pour définir notre modèle générique de voie ferroviaire, nous définissons la couleur **RAILLINE** (Tableau 2). Outre l'identifiant et la catégorie de la voie, il est d'abord nécessaire d'indiquer les nœuds reliés en accessibilité directe (attributs **"from"** et **"to"**). Il est d'autre part nécessaire de définir le temps moyen de parcours de la voie (attribut **"travel_time"**) et la capacité en trains de la ligne (attribut **"train_cap"**). Cette capacité correspond au nombre maximal de circulation pouvant se trouver simultanément sur la ligne. Cette capacité est décrétementée chaque fois qu'un nouveau train rentre sur la ligne. Réciproquement, elle est incrémentée chaque fois qu'un train sort de la ligne. Lorsqu'elle vaut 0, aucun train ne peut rentrer sur la ligne (cf. la garde de la transition **"to_line"** de la Figure 6). Les attributs **"availability_date"** et **"train_paths"** définissent respectivement la date du prochain sillon disponible et les sillons résiduels. **"train_paths"** correspond ainsi à une liste de dates.

Pour traiter cette structure de données, nous définissons les fonctions ML **"addTrainIn-Line(lg:RAILLINE)"** et **"rmvTrainOfLine(lg:RAILLINE)"** servant à mettre à jours les paramètres de capacité de la voie en cas d'arrivée d'une nouvelle circulation ou de sortie de la circulation de la voie (cf. Tableau 2). Dans le modèle RdPCTH de la Figure 6, nous utilisons deux formes de temporisation exploitant les attributs temporels de la ligne. La transition **"to_line"** est temporisée avec l'attribut **"availability_date"** afin de générer dans la place **"in_line_log"** un jeton du train daté à la date d'entrée sur la ligne. L'arc entre **"to_line"** et la place **"Inside_line"** est également temporisé à l'aide de l'attribut **"travel_time"** afin d'ajouter à cette date d'entrée, la durée de parcours de ligne. Cette double temporisation permet d'adapter le parcours de la ligne au principe de sillons ferroviaires. En effet, les je-

tons arrivant dans la place **"Inside_line"** sont indisponibles jusqu'à la date correspondant à **"availability_date" + "travel_time"**. Ils peuvent alors franchir la transition **"from_line"** modélisant la sortie de la ligne. Le respect des sillons définis pour le fonctionnement du fret ferroviaire peut être vérifié dans la place **"OUT_line_log"** qui mémorise la date de sortie de chaque circulation ayant emprunté la voie.

6.4 Modélisation du réseau ferroviaire au niveau A1

Au niveau A1, le réseau ferroviaire est modélisé sous la forme d'un graphe respectant la topologie du réseau réel. Chaque nœud du réseau ferroviaire est représenté par une transition de substitution avec une place socket d'entrée et une place socket de sortie comme le modèle de la Figure 2b auquel on ajoute une socket de type I/O pour le paramétrage du nœud. Ce paramétrage est réalisé en spécifiant les valeurs des attributs lors de l'initialisation de la place de paramétrage au niveau A1. Chaque voie raccordant 2 nœuds en accessibilité directe est représentée par un composant "voie" également modélisé au niveau A1 de manière analogue au cas des nœuds (une transition de substitution avec trois places sockets). La seule différence c'est que la place de paramétrage cette fois-ci est de type RAILLINE au lieu d'être de type RAILNODE. Au niveau A1, il n'y a plus qu'à fusionner la socket de sortie d'un nœud avec la socket d'entrée des voies ferroviaires issues de ce nœud. De même, il suffit de lier la socket de sortie d'une lignes ferroviaire avec la socket d'entrée du nœud de destination de cette ligne. La deuxième phase consiste à raffiner chaque nœud défini au niveau A1. Quand c'est un nœud ferroviaire appartenant à un nœud intermodal les sockets d'entrées sorties du nœud sont fusionnées avec les sockets définies par l'instance ferroviaire au niveau A1 du nœud intermodal (cf. Figure 5). Les voies ferroviaires sont directement raffinées avec le modèle générique de voies donné par la Figure 6.

7 Illustration de l'approche

Afin d'illustrer l'approche de modélisation proposée, imaginons que nous souhaitions modéliser le système multimodal qui relie le nœud multimodal de Dunkerque au nœud de Dourges et au nœud de Lille. La Figure 7 illustre une partie du modèle CPN Tools du réseau ferroviaire obtenu au niveau A1. Il correspond aux nœuds ferroviaires et aux voies dont les caractéristiques sont données par le Tableau 3 et le Tableau 4. Même pour ce cas d'étude relativement restreint, nous pouvons apprécier la taille du modèle réalisé. Rien qu'au niveau A1, le modèle du réseau ferroviaire compte 45 places et 21 transitions. Il est trop grand pour en présenter une image compréhensible au format A4.

Afin d'illustrer le fonctionnement du système, nous avons simulé le routage de 4 trains dans ce réseau ferroviaire. Les 4 trains partent de Dunkerque et doivent rejoindre le nœud multimodal de Dourges. Mais, ils empruntent des itinéraires différents. Leurs itinéraires sont donnés par la 2ème colonne du Tableau 5. Chaque itinéraire est défini en donnant dans l'ordre, les nœuds de passage. Par exemple, le train n°1 est censé passer par HABROUCK (HASBR), puis LILLE, puis DON SANGHAIN (DON), puis LENS et enfin il atteint DOURGES. Les différentes circulations partent toutes les 15 mn. L'objectif est d'évaluer leurs performances respectives afin d'analyser l'impact du contrôle ferroviaire. Le contrôle ferroviaire est défini par les sillons disponibles pour les circulations de fret au niveau de chaque voie. Ces sillons correspondent aux dates données par la colonne "sillon" du Tableau 4. Par exemple, pour la voie de Dunkerque à Hazebrouck (DunkToHASBR), on dispose de 3 sillons : 20, 40, 60. Le premier train qui empruntera cette voie devra attendre 20 mn avec de prendre la voie. Le

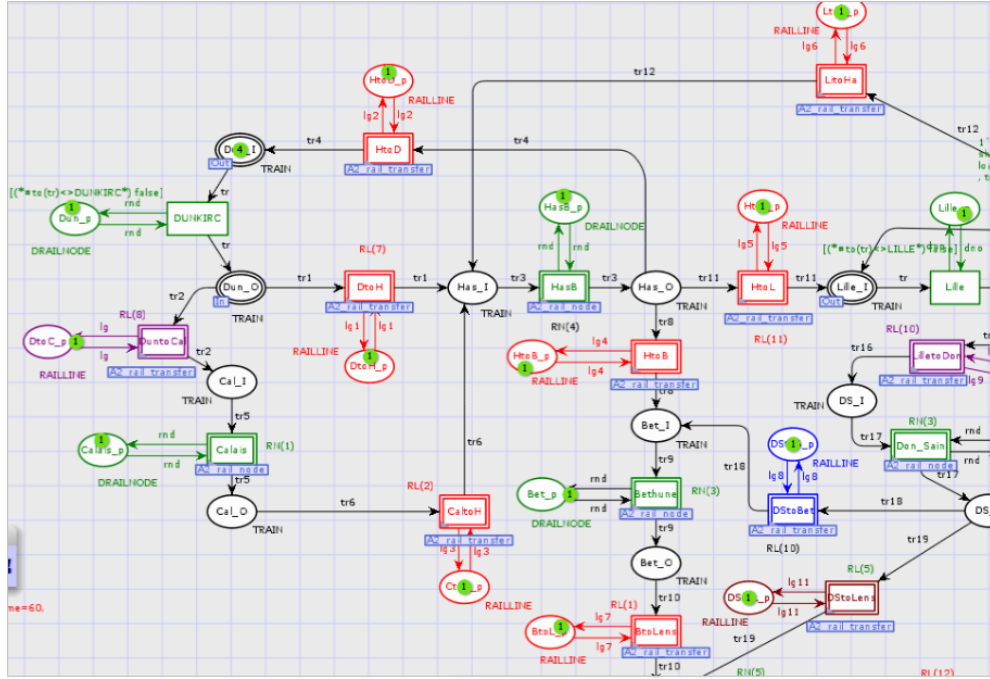


Figure 7: Réseau ferroviaire simplifié reliant Dunkerque à Dourges

| Nœuds ferroviaire | Capacité | Plateformes | Délai en | Délai en | Durée de | Noeuds voisins | Default_routing |
|-------------------|----------|-------------|----------|----------|----------|---------------------------------|-----------------|
| BETHUNE | 2 | 2 | 10 | 10 | 20 | LENS, HASBR | LENS |
| CALAIS | 2 | 2 | 10 | 10 | 20 | HASBR | HABR |
| DON | 2 | 2 | 5 | 5 | 10 | LENS, BETHUNE, DOURGES, LILLE | DOURGES |
| DOURGES | 4 | 4 | 15 | 15 | 30 | LENS, OSTR, DON | |
| DUNKIRC | 4 | 4 | 10 | 10 | 20 | HASBR | HASBR |
| HASBR | 5 | 3 | 20 | 20 | 40 | LILLE, DUNKIRC, CALAIS, BETHUNE | BETHUNE |
| LENS | 3 | 3 | 15 | 15 | 30 | BETHUNE, DON, DOURGES | |
| LILLE | 8 | 8 | 25 | 25 | 50 | HASBR, OSTR, DOU | OSTR(ICOURT) |
| OSTR(ICOURT) | 2 | 2 | 5 | 5 | 10 | LILLE, DOURGES | DOURGES |

Table 3: Paramètres des nœuds ferroviaires du modèle

2ème train, devra attendre 40 mn et le 3ème 60 mn. Les dates de disponibilités des sillons sont données de manière relative par rapport au départ du train du nœud source. Nous reviendrons dans la conclusion sur cet aspect. Dans la colonne "durée moyenne de parcours" du Tableau 4, on a le temps de parcours de chaque voie et dans la colonne "Durée de traversée" du Tableau 3, nous avons le temps de traversée de chacun des nœuds.

Afin de bien illustrer l'impact, dans le Tableau 5, nous avons donné la durée théorique de chaque train et la durée obtenue par simulation. La première chose que nous pouvons remarquer c'est que les durées simulées sont plus importantes que les durées théoriques. Cela est tout simplement dû aux attentes de disponibilité des sillons. Ces attentes étant de plus en plus longues en fonction des l'ordre d'arrivée des trains pour emprunter une voie, les derniers trains sont plus fortement désavantagés que les premiers. Le train 4, bien que parti en dernier, arrive le premier à Dourges. Cela est dû au fait qu'il utilise l'itinéraire le plus court tant en

| Voies | Catégorie | Durée moyenne de parcours | Capacité | Sillons |
|-------------|-----------|---------------------------------|----------|----------------|
| DunkToHas | 2 | 50 | 3 | 20, 40, 60 |
| BetToLens | 4 | 40 | 4 | 15, 30, 45, 60 |
| CalToHasbr | 5 | 60 | 3 | 20, 40, 60 |
| DSToBet | 8 | 50 | 2 | 30, 60 |
| DSToLens | 6 | 40 | 2 | 30, 60 |
| DunkToCal | 6 | 60 | 2 | 30, 60 |
| HasToBeth | 4 | 50 | 4 | 15, 30, 45, 60 |
| HasToLille | 2 | 60 | 6 | 20, 30, 40, 50 |
| LensToDou | 4 | 30 | 2 | 30, 60 |
| LilleToDS | 6 | 40 | 2 | 30, 60 |
| LilleToOstr | 4 | 20 | 2 | 30, 60 |
| OSToDou | 4 | 30 | 2 | 30, 60 |

Table 4: Paramètres des voies ferroviaires reliant les nœuds en accès direct

| Trainid | Itinéraire | Durée théorique | Simulations | | |
|---------|---|--------------------|-------------------|-------------------|------------------|
| | | | Date de départ | Date d'arrivée | Durée simulée |
| 1 | HASBR, LILLE, DON, LENS, DOURGES | 370 | 0 | 490 | 490 |
| 2 | CALAIS, HASBR, BETHUNE, LENS, DOURGES | 370 | 15 | 525 | 510 |
| 3 | CALAIS, HASBR, LILLE, OSTR, DOURGES | 375 | 30 | 655 | 625 |
| 4 | HASBR, LILLE, OSTR, DOURGES | 285 | 45 | 450 | 405 |

Table 5: Résultats de la simulation

nombre de nœuds qu'en durée théorique. En fait, il utilise l'axe le plus performant avec des voies de catégorie 2 ou de catégorie 4. Le train 3, bien qu'il ait en théorie des durées d'itinéraires proches des deux premiers, ils arrivent beaucoup plus tard. La raison est qu'il a été pénalisé dans un premier temps par son utilisation en 3ème position de la voie Hazebrouck-Lille. D'autre part après Lille, il en emprunte des voies de catégorie 8 pour atteindre Lens. Il est donc pénalisé par les faibles vitesses sur ces voies.

8 Conclusion

Cette étude a pour but le développement un outil d'aide à la décision afin d'utiliser le transport multimodal terrestre comme alternative au transport maritime de fret pour des distances moyennes comme celles reliant les ports Européens. Nous avons montré qu'une des problématiques à prendre en compte, c'est la nécessité de modéliser un système de systèmes. Ainsi chaque nœud du système global est lui-même un système qu'il est nécessaire de modéliser avec une certaine granularité. Nous avons montré comment nous pouvions adapter CPN Tools à une modélisation "orientée objets" de nos composants. L'utilisation de Réseaux de Petri à Objets (RdPO) auraient été plus appropriés. Mais à notre connaissance, il n'existe pas d'éditeur de RdPO opérationnel [9].

L'une des perspectives de ce travail se réside en une modélisation plus fine du concept de

sillons utilisé par le contrôle ferroviaire. Pour cela, il sera nécessaire d'utiliser des dates absolues pour modéliser les sillons or par défaut CPN Tools ne le permet pas. Une autre perspective sera de prendre en compte des perturbations aléatoires dans le fonctionnement des systèmes utilisés. Le caractère aléatoire peut être utilisé aussi bien par rapport aux temporisations du modèle, mais également pour modéliser des pertes en capacité.

Remerciements

This work was supported in part by the Safe and Climate Resilient Ports (SAFARI) Project, which is Co-Funded by the European Union through the Horizon Europe Program under Grant 101147432.

References

- [1] Valentina Boschian, Mariagrazia Dotoli, Maria Pia Fanti, Giorgio Iacobellis, and Walter Ukovich. A metamodeling approach to the management of intermodal transportation networks. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 8(3):457–469, 2011.
- [2] R. Davidrajuh. *Petri nets for modeling of large discrete systems*. Springer Singapore, 2021.
- [3] Mariagrazia Dotoli, Nicola Epicoco, Marco Falagario, and Graziana Cavone. A timed petri nets model for intermodal freight transport terminals. *IFAC Proceedings Volumes*, 47(2):176–181, 2014. 12th IFAC International Workshop on Discrete Event Systems (2014).
- [4] Igor Kabashkin and Zura Sansyzbayeva. Methodological framework for sustainable transport corridor modeling using petri nets. *Sustainability*, 16(2), 2024.
- [5] Y. Lei and H. Mu. Analysis and optimization of a stochastic petri net for air-rail intermodal transportation. In *Plos one*, 19(7), e0307647, 2024.
- [6] Tian Liu and Haiyan Wang. Evaluating the service capacity of port-centric intermodal transshipment hub. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(7), 2023.
- [7] Faiza Mahi, Ahmed Nait-Sidi-Moh, Fatima Debbat, and Mohamed-Faycal Khelfi. Modelling and control of a multimodal transportation system using hybrid petri nets with fuzzy logic. *Int. J. Syst., Control Commun.*, 5(3/4):255–275, December 2013.
- [8] Olexiy V. Pavlenko, Denys O. Velykodnyi, Olena Lavrentieva, and Sergiy V. Filatov. The procedures of logistic transport systems simulation in the petri nets environment. EasyChair Preprint 4186, EasyChair, 2020.
- [9] F. Raclot, David Andreu, Thérèse Libourel, and Robin Passama. E-netobject: Un editeur de réseaux de petri à objets. 01 2002.
- [10] J. B. Salminen. Measuring the capacity of a port system: a case study on a southeast asian port. In *Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology*, 2013.
- [11] Yuri Triska, Enzo Morosini Frazzon, and Vanina Macowski Durski Silva. Proposition of a simulation-based method for port capacity assessment and expansion planning. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 103:102098, 2020.